

# 超弾性有限要素解析検証のための実験システムの開発

平田 忍<sup>\*</sup>, 横田 秀夫<sup>\*</sup>, 姫野 龍太郎<sup>\*</sup>, 牧野内 昭武<sup>#</sup>

<sup>\*</sup> 理化学研究所 生体力学シミュレーション特別研究ユニット  
埼玉県和光市広沢 2 - 1

e-mail: {shirata, hyokota, himeno}@riken.jp

<sup>#</sup> 理化学研究所 もの作り V - C A D

埼玉県和光市広沢 2 - 1

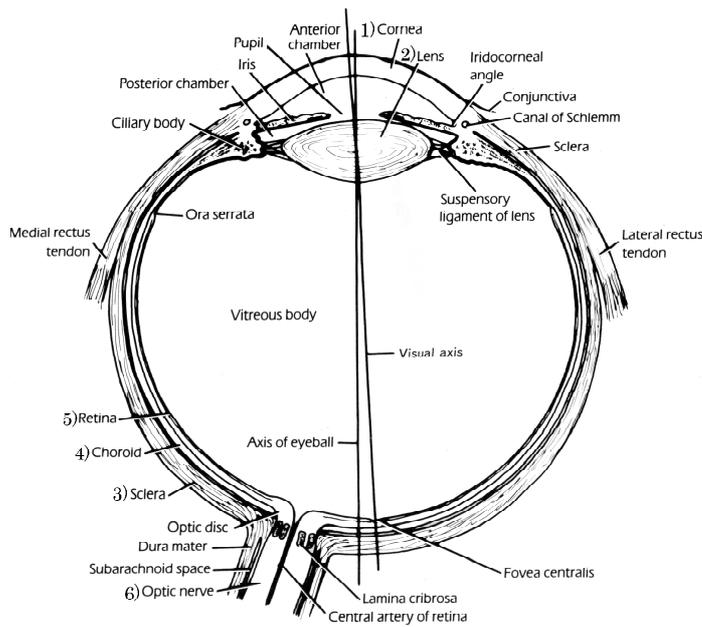
e-mail: akitake@riken.jp

**要旨** 我々は、有限要素法(FEM)を用いた網膜剥離手術シミュレーションの開発を行っている。このプログラムは超弾性体を扱うものであり、現在プログラムは完成している<sup>1),2)</sup>が、実際の挙動を再現するかの検証は行われていない。そこで、再現性を検証するための実験システムの開発を行った。まず、解析の検証に必要な圧縮応力、内圧、および外形寸法の値を得るために、精密万能試験機で超弾性体を 5mm づつ圧縮し、そのときの物体の応力を万能試験機で、物体の内圧をひずみゲージ圧力センサを用いてそれぞれ計測する。また、電動モータで位置制御した z 軸ステージ上に搭載したレーザセンサを上下させ、形状変化の測定を行う。各値はアナログ出力され、AD 変換ボードを取り付けたパソコンに取り込むことにより自動的にデータを収集することが可能となった。これらの装置を用いて実験を行い、圧縮応力、内圧、外形寸法の各測定データを収集し、それらの値について検討した。

## 1. 緒言

目は視覚を司る感覚器官であり、人体の感覚受容器の約 70% が目にあるとされている。この目は一般に眼球と呼ばれ、直径約 3cm の中空の球形をしている(図1)。眼球壁は外から強膜、脈絡膜、および 3 層の膜からなり、眼球内には液体が満ちていて、その球形が保たれている。ものを見るときに焦点を合わす役割をもつ水晶体は、眼球の全部で縦に固定されており、眼球内を 2 つの空間に分けている。

網膜剥離とは、脈絡膜と網膜の癒着が剥がれる疾患である。これは、眼球を強打することや、加齢により発症するもので、レーザ焼結手術や輪状締結手術等を行うことにより治療が可能である。このうち、輪状締結手術はシリコンリングを網膜剥離部に押し当て、剥がれた部分を癒着される手術方法である。この手術は、締結が緩いと剥離部分が癒着せず、きつすぎると視力が低下する危険性があり、押し当てる力を加減することは経験を要するものである。<sup>3),4)</sup>そこで我々は、FEM を用いた網膜剥離手術シミュレーションを開発することにより、術前に行う適正な手術方法の検討や、経験を積むための手術訓練に役立てるのではないかと考えている。現在、シミュレーションのための超弾性 FEM プログラムは完成しているが、このプログラムが実際の挙動をどのくらい再現するかについての検証はまだ行われていない。そこで、プログラムの再現性を検証するために超弾性体の圧縮試験実験システムを開発し、その装置を用いて実験を行い、測定データについて検討を行った。



- 1.角膜(Cornea) 2.水晶体(Lens) 3.強膜(Sclera) 4.網膜(Retina)  
5.脈絡膜(Choroid) 6.視神経(Optic Nerve)

Fig.1 Eyeball

## 2. 実験装置の開発

### 2-1 実験対象物の検討

眼球は個体差があり，実験対象として最初から眼球を扱うことは，実験装置の精度や再現性の検討の問題から難しいと判断される．そこで，超弾性体の物体として，大きさが均一で入手しやすいものとして，日本ソフトテニス連盟公認球ゴムボール(ナガセケンコー:TSOW-V)を用いた．また，このボールを擬似的に眼球に見立てるためにボール内部に水を満たすことにした．ボールの空気注入部のゴムは，空気入れの針を抜き差し出来る素材になっている．そこに，水を入れた注射器を差込みボール全体に水を満たし，針を刺したまま真空チャンバー内に入れ，真空ポンプで陰圧にして気泡を除去した．その後，確認のためにX線マイクロCTを用いてボール内部の気泡が除去されているかを確認する．気泡が残っている場合は，気泡の除去をもう一度行い，X線マイクロCTで確認を行う．気泡が無くなり，ボール内が水で完全に満たされていることを確認し，そのボールを用いて実験を行った．

### 2-2 実験装置の開発

超弾性のFEM解析では，外から物体を押したときの応力，押されたときの内圧，および，物体の変形具合を求めている．そこで，実験においても同様の値を求める必要がある．そのために，これらの値を求める条件を満足する実験装置を図2の様に設計した．この条件を満たすように実際の装置を選定し組み上げていくこととした．

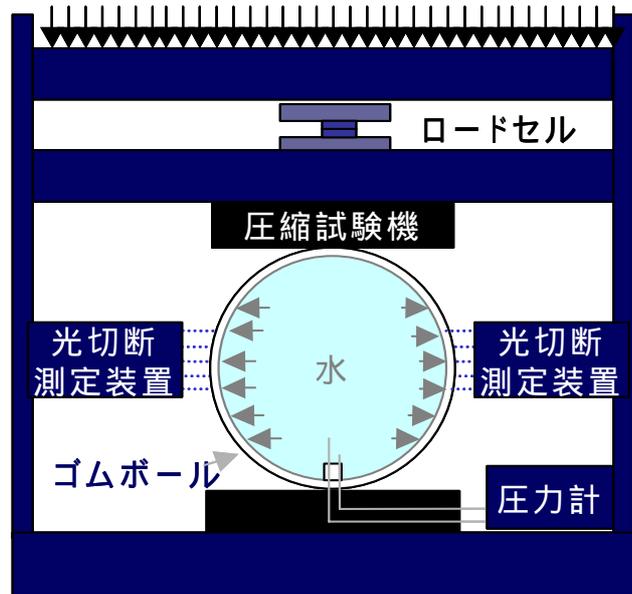


Fig.2 Outline of Experimental System

まず，外からボールを押し，そのときの応力を測定する装置として，精密万能試験機（島津:AGS-H）を用いる．この装置の外部出力コネクタから圧縮時の荷重と位置をアナログ出力させ，AD変換ボード（Interface:PCI-3171A）を通してパソコンに送られる．ボードを通して送られたデータはパソコン上に csv 形式で保存される．csv 形式とは数値をカンマ区切りで羅列していく保存形式で結果の処理が容易に行える．

次に，ボールの内圧を測定するために，万能試験機で圧縮試験を行うときに底辺に取り付ける台座の上部から側面部を繋ぐように L 字型に穴を開け，台座上部の穴にボールに刺した針を差し込めるように設計する．また，台座側面部の穴にひずみゲージ圧力センサ（SENSOTEC:THE/0708-08TJG）を取り付けた．こうすることにより，ボールが変形した時のボール内部の圧力が計測できるようになった．出力値は，動ひずみ測定器（共和電業:DPM-601A）を通してアナログ出力し，試験器と同様にボードを通してパソコンに送られ同様に csv 形式で保存される．

また，ボールの外形については，レーザセンサ（オムロン:3Z4L-S512R）を用いて計測を行うように設計した．このセンサは，レーザ光を発光し反対側の受光部でレーザ光を受けその差を計算することにより，物体の幅を計測することが出来る装置である．センサの出力値もまた，ボードを通してパソコンに送られ保存される．圧縮試験において，ボールの径は圧縮試験機の圧板から底板まで，板に平行に 5mm 間隔で計測することとした．そこで，このセンサを上下に移動させる必要がある．よって，2本の z 軸ステージの軸にモータ（オリエンタルモータ:ASM66MA-T7.2）を取り付け，パソコンに取り付けたステッピングモータコントローラ（Interface:PCI-7211A）を用いて，パソコン上でプログラムを作成し，モータをコントロールしステージを自動で上下させるようにした．ステージの移動が終了すると，AD変換ボードでデータ取得することにより，ステージの移動とデータ取得が，一つの行程で行われるようにプログラミングした．このステージに橋を渡すように台座に取り付け，そこにセンサを載せることにより上下動に対応した．完成した実験装置を図 3 に示す．

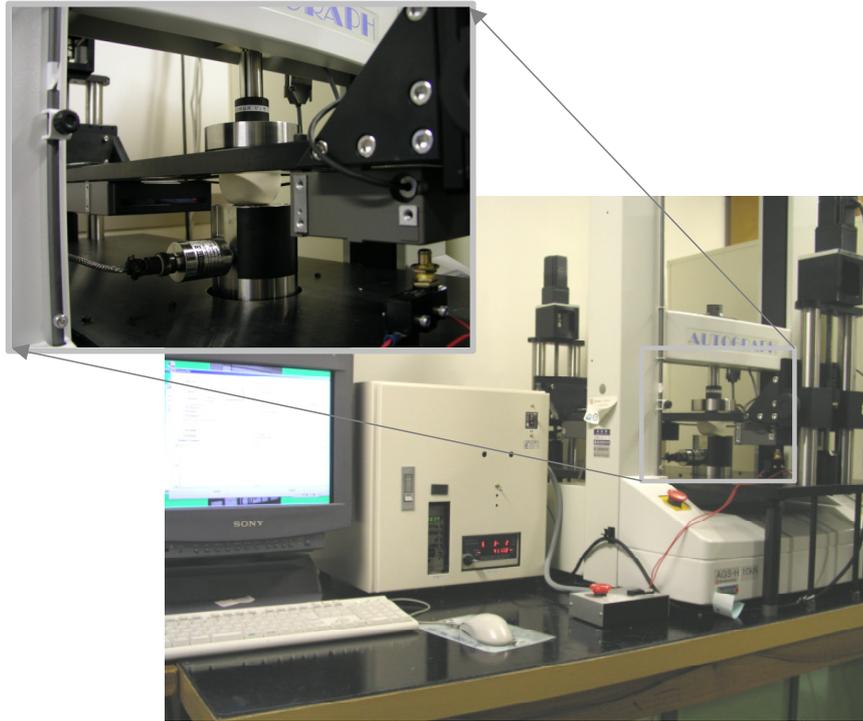
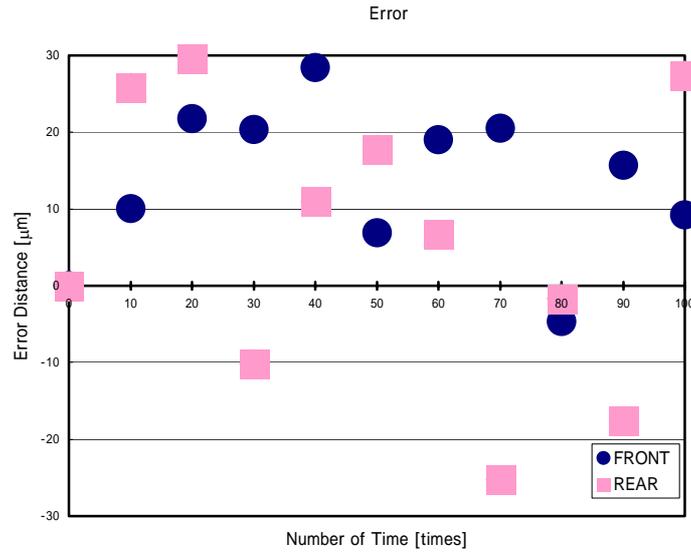


Fig.3 Experimental System

### 2-3 実験装置の精度の検証

開発した実験システムが正しく動作するかについての検証を行った。まず、台座を取り付けたz軸ステージの移動距離精度について実験を行った。モータを用いてz軸ステージを移動距離50mmとし、100回上下させる。初期位置が0回、ステージが50mm下に移動した状態を1回、50mm上に移動した状態を2回とし、上下動を繰り返す。このとき、末尾が0になる回のステージの位置を測定し、その回における移動距離の誤差を測定した。末尾が0になる回は初期位置と同じ位置にステージが移動する。そこで、各回の位置が初期位置とどのくらいずれているか計測したときのグラフを図4に示す。図より移動距離のずれは約50 $\mu$ m以内に収まっている。これは、移動距離50mmに対して0.1%の誤差である。よって、この誤差は実験を行うに当たって許容できる範囲であると判断した。

次に、圧力センサの精度の検証として再現性についての実験を行った。装置にシリンジに空気を入れたものをセットし5mm圧縮したときの圧縮試験機の応力とシリンジの内圧を測定した。その後、5mm圧縮、各値を6回繰り返し行った。同じ行程で実験を2回行い、各位置について応力と内圧の比較を行った。そのときの試験機応力のグラフを図5に、ボール内圧のグラフを図6に示す。図5,6と表2より、応力も内圧も二回とも各位置に置いてほぼ同じ値を示しており、この装置において、圧力計の再現性は保たれていると判断できる。また、圧力センサの出力値の検証として、別の圧力センサを同時にボールにつけ、圧力差がどのくらいあるのか比較を行った。どちらも、ゲージ圧であり大気圧がゼロとなる。装置の出力値について、別の圧力計を用いて空気の場合の圧力を測定し、比較したところほぼ同じ値を示すことを確認した。よって、この圧力センサは実験に必要な精度を満たしていること判断した。



**Fig.4 Error of Move Distance**

**Table.2 Value of Pressure**

Indentation Distance [mm]	Pressure [kPa]	
	Test1	Test2
0.0	2.941	2.820
0.5	12.207	11.869
1.0	22.938	22.697
1.5	36.055	35.913
2.0	52.385	52.282
2.5	73.166	73.020
3.0	100.398	100.251



**Fig.5 Stress Curve**

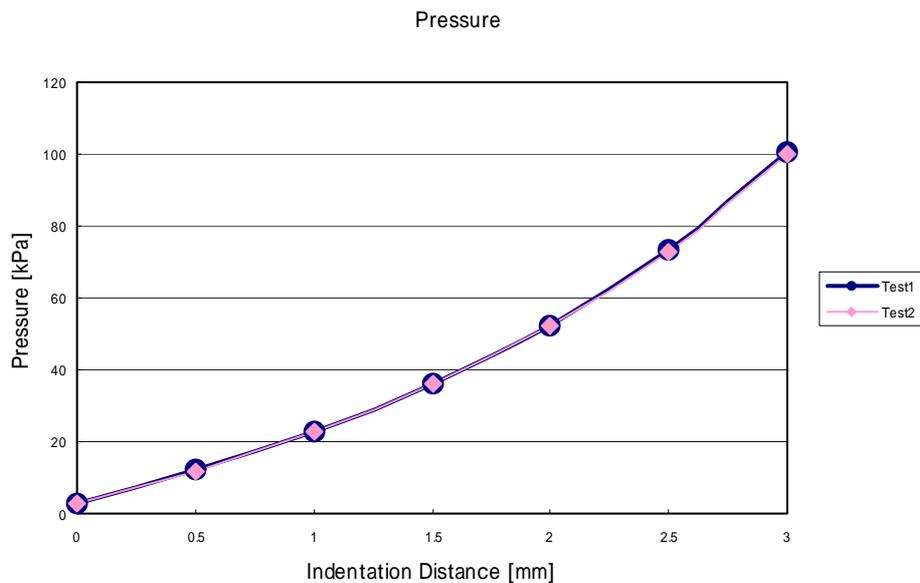


Fig.6 Pressure Curve

### 3. 結果と考察

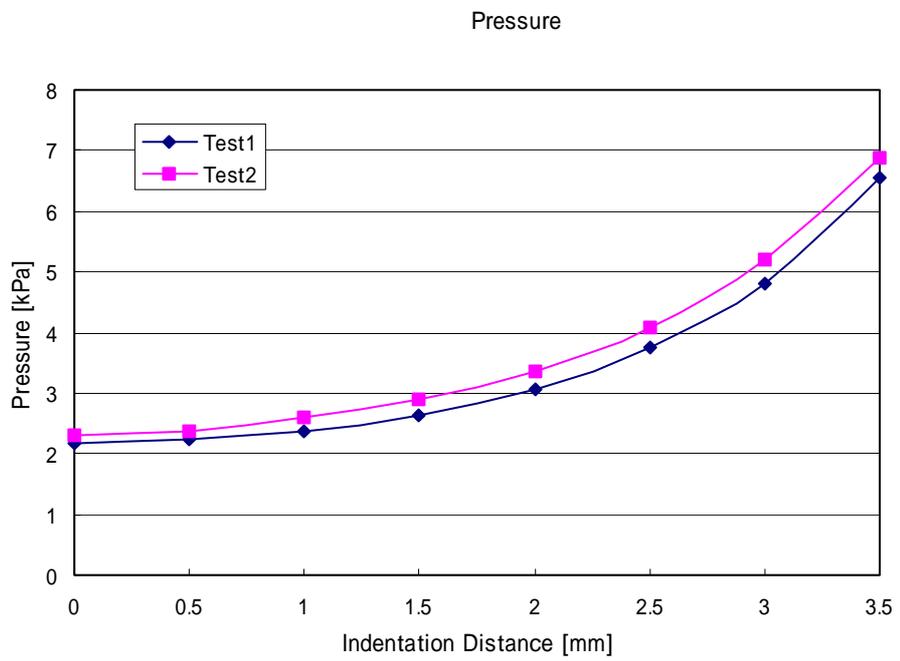
眼球に見立てた、内部に水を満たした軟式テニスボールを、精密万能試験機で5mm づつ圧縮し、そのときの試験機にかかる応力、また、ボール内にかかる内圧をひずみゲージ圧力センサを用いて計測した。試験機応力を図7に、ボール内圧を図8に示す。

ボールの応力はフックの法則に従い、内圧は等温圧縮率に反比例すると考えられる。図より内部に水を満たしたボールを圧縮したとき、ボールにかかる応力と圧縮量の関係は、通常の圧縮試験と同じような傾向を示した。また、内圧についても、圧縮率に反比例するようなグラフになっている。しかし、内圧の変化量は小さい。これは、ボールが変形しているため体積の変化が大きくなかったためと考えられる。また、図に示すように、ボールにかかる応力、内圧とも2回の試験においてほぼ同じ傾向を示し、再現性があることも確認できた。

同時に形状の変化を計測するために、電動モータを用いて位置制御したz軸ステージを用い、レーザセンサを上下させて測定を行った。初期のボールの直径と、最も圧縮したときのボールの径をグラフにしたものを図9に示す。圧縮されることにより、ボールの径が変化していくことをレーザセンサで測定し形状を記録することができた。ボールは初期状態の球形から、圧板で押されることにより、だんだん樽型に変形していく。今回の実験においては、径は約2cm大きくなった。



**Fig.7 Stress Curve**



**Fig.8 Pressure Curve**

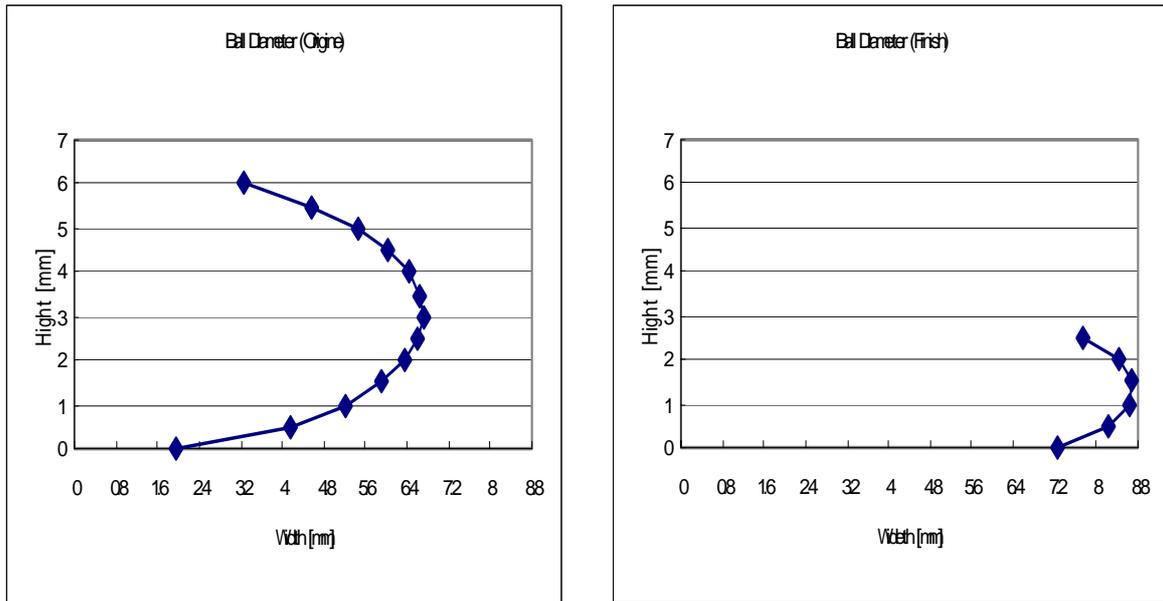


Fig.9 Ball Diameter

#### 4. まとめ

超弾性体の実験装置を開発し、実験を行った。万能試験機とレーザセンサ、およびひずみゲージ式圧力センサを組み合わせることによりFEM解析に必要なデータを求める装置を作成することができた。この実験システムにおいて内部に水を満たしたテニスボールを5mm毎に圧縮したとき、各位置におけるボールの応力値は通常の圧縮試験と同じ挙動を示すことが分かった。一方、内圧においては、等温圧縮率に反比例しているものの、ボールが変形するため体積の変化が少なく、内圧の変化が小さいことが分かった。

現在、この実験システムにおける実験までしか行えていない。今後は、この結果とFEMプログラムの結果との比較検討を行っていき、網膜剥離手術シミュレーションの実現に向けていきたい。

#### 参考文献

1. Sun Z.G., et, "Improved 3D FEM Program for Simulation the Retina Detachment Operation on an Eyeball", RIKEN SYMPOSIUM(2002), 45-55
2. 孫他, "実用化に向けての眼球網膜剥離手術数値シミュレーションのための FEMプログラムの開発", (2003)
3. E. N. Marieb, "人体の構造と機能", 医学書院, (1997)
4. R.S. Snell, et, "目の臨床解剖学", 医学書院, (1993)